

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 03.10.2014г. № 14.626.21.0001 по теме «Исследования и разработка экспериментальных аддитивных технологий для изготовления и ремонта сложнопрофильных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) с использованием металлических порошков жаропрочного сплава на основе никеля» с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе 3 «Разработка технологии изготовления сложнопрофильных деталей ГТД методом послойного лазерного сплавления металлических порошков жаропрочных сплавов на основе никеля (МПЖСН)» в период с 01.07.2015 по 31.12.2015 выполнялись следующие работы:

- обоснованы требования к сложнопрофильным деталям ГТД, изготавливаемым методом послойного лазерного сплавления МПЖСН;
- разработана программа и методики экспериментальных исследований технологических режимов процесса послойного лазерного сплавления МПЖСН;
- проведены экспериментальные исследования технологических режимов процесса послойного лазерного сплавления МПЖСН экспериментальных партий и импортного МПЖСН промышленной серии;
- обоснован выбор диапазонов значений основных технологических параметров процесса послойного лазерного сплавления МПЖСН экспериментальных партий и импортного МПЖСН промышленной серии;
- изготовлены лабораторные образцы сложнопрофильных деталей ГТД методом послойного лазерного сплавления МПЖСН экспериментальных партий в соответствии с выбранными диапазонами значений основных технологических параметров;
- разработана программа и методики исследований состава (химический состав, фазовый состав), структуры и свойств (плотность, пористость) материалов сложнопрофильных деталей ГТД, изготовленных методом послойного лазерного сплавления МПЖСН;

- проведены исследования состава, структуры и свойств материалов, лабораторных образцов сложнопрофильных деталей ГТД, изготовленных методом послойного лазерного сплавления МПЖСН экспериментальных партий;

- разработана программа и методики механических испытаний (ударный изгиб, кратковременная и длительная прочность, малоцикловая и многоцикловая усталость) сложнопрофильных деталей ГТД, изготовленных методом послойного лазерного сплавления МПЖСН;

- проведены механические испытания лабораторных образцов, изготовленных методом послойного лазерного сплавления МПЖСН экспериментальных партий;

- обоснованы оптимальные значения технологических параметров процесса послойного лазерного сплавления МПЖСН экспериментальных партий;

- изготовлены лабораторные образцы сложнопрофильных деталей ГТД методом послойного лазерного сплавления импортного МПЖСН промышленной серии в соответствии с выбранными диапазонами значений основных технологических параметров;

- проведены исследования состава, структуры и свойств материалов, лабораторных образцов сложнопрофильных деталей ГТД, изготовленных методом послойного лазерного сплавления импортного МПЖСН промышленной серии;

- проведены механические испытания лабораторных образцов, изготовленных методом послойного лазерного сплавления импортного МПЖСН промышленной серии;

- обоснованы оптимальные значения технологических параметров процесса послойного лазерного сплавления импортного МПЖСН промышленной серии.

- разработана технологическая инструкция по изготовлению сложнопрофильных деталей ГТД методом послойного лазерного сплавления

МПЖСН экспериментальных партий и импортного МПЖСН промышленной серии;

- разработана программа и методики вычислительных экспериментов по построению 3D-распределений температуры и полей фазовых превращений (плавления и кристаллизации) для различных механизмов зародышеобразования (гомогенного и гетерогенного) в зоне сплавления МПЖСН;

- проведены вычислительные эксперименты по построению 3D-распределений температуры и полей фазовых превращений для различных механизмов зародышеобразования в зоне сплавления МПЖСН экспериментальных партий и импортного МПЖСН промышленной серии.

В процессе работы обоснованы диапазоны значений основных технологических параметров процесса послойного лазерного сплавления и проведены экспериментальные исследования технологических режимов процесса послойного лазерного сплавления МПЖСН экспериментальных партий и импортного МПЖСН промышленной серии на установках послойного синтеза ConceptLaser M2 и SLM280HL, определены и обоснованы оптимальные значения технологических параметров процесса послойного лазерного сплавления МПЖСН экспериментальных партий.

Изготовлены лабораторные образцы сложнопрофильных деталей ГТД методом послойного лазерного сплавления МПЖСН экспериментальных партий в соответствии с выбранными диапазонами значений основных технологических параметров, показано соответствие полученных образцов сложнопрофильных деталей требованиям ТЗ по геометрии (среднее отклонение от 3D-модели составило 40 мкм).

По результатам структурных исследований и испытаний механических свойств установлено, что выбранные параметры синтеза обеспечивают получение высоких механических свойств для свариваемого сплава ВЖ159 при наличии значительной анизотропии в вертикальном и горизонтальном направлениях. Уровень свойств литейных сплавов после синтеза уступает свойствам литого металла и для достижения требований по механическим

свойствам требуется применение газостатической и термической обработок на следующем этапе работы.

Проведено исследование влияния параметров построения (мощность лазера, скорость трассировки, расстояние между отдельными проходами) образцов методом послойного лазерного сплавления из импортного порошка Inconel 718 на пористость тестовых образцов. Проведено исследование микроструктуры, химического состава, фазового состава, пористости изготовленных образцов. Определены механические свойства (ударная вязкость, кратковременная прочность при комнатной и повышенной температурах, длительная прочность) образцов, полученных методом послойного лазерного сплавления по разработанным режимам построения, а также исследование режимов построения на анизотропию свойств.

По результатам исследования влияния параметров построения образцов на плотность получаемых образцов был установлен режим, позволяющий получать наиболее плотные образцы, измерения относительной плотности показали, что среднее значение относительной плотности изготовленных образцов составляет 99,94 %.

Проведенные механические испытания при комнатной и повышенной температуре показали, что образцы не соответствуют стандартам для данного материала, однако все стандартизированные данные приводятся для образцов после термической обработки (гомогенизация и многоступенчатое старение), что является важнейшим инструментом достижения требуемого структурно-фазового состояния для жаропрочных дисперсионно-твердеющих сплавов, к которым относится сплав Inconel 718. Поэтому необходимо проведение исследований влияния термической обработки (включая горячее изостатическое прессование) на изменение структуры, фазового состава и механических характеристик образцов, изготовленных послойным лазерным сплавлением металлических порошков жаропрочных никелевых сплавов.

На основе созданных ранее вычислительных моделей и алгоритмов разработаны программа и методики вычислительных экспериментов по построению 3D-распределений температуры и полей фазовых превращений

для гомогенного и гетерогенного зародышеобразования в зоне сплавления МПЖСН.

Проведены вычислительные эксперименты по построению 3D-распределений температуры и полей фазовых превращений для различных механизмов зародышеобразования в зоне сплавления МПЖСН экспериментальных и опытных партий и импортного МПЖСН промышленной серии. В основе численных экспериментов лежит математическая модель, включающая в себя сопряженные нестационарные уравнения теплопередачи и массопереноса, Навье – Стокса для полей скоростей расплава и кинетическое уравнение для гомогенного и гетерогенного зародышеобразования в метастабильной (перегретой или переохлажденной) фазе.

Рассчитаны эволюция температурного поля, вихревая структура течений в ванне и распределение по глубине скорости перемещения расплава, а также профили сплавленных слоев для различных параметров процесса и характеристик лазерного излучения. Полученные расчетные кривые демонстрируют значительное влияние мощности лазерного излучения, скорости сканирования и потока массы частиц на динамическое поведение расплава в зоне сплавления и на геометрические характеристики сплавленного слоя (глубина и ширина зоны проплавления, высота наплавленного слоя).

Проведенные численные эксперименты позволили получить информацию о тепло-гидродинамических процессах, вызванных мощным лазерным воздействием на ультрадисперсные порошковые системы на никелевой основе при наплавке: описать 3D процессы установления тепловых и концентрационных полей, конвективных течений, а также объемных долей превратившихся фаз в зависимости от энергетических характеристик лазерного излучения и параметров потока инжектируемых частиц порошка.

Разработанная программа и методики, проведенные на их основе численные эксперименты открывают возможности прогнозирования и

оптимизации параметров качества синтезируемых слоев путём эффективного управления процессами переноса и фазовых превращений на основании математических моделей, связывающих параметры лазерного излучения, потока частиц и качество наплавки.